

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**Аналоговий електронний вольтметр**

Студент гр. ЕІ-61

А.М.Ємельянов

Науковий керівник,  
викладач

О.І. Федчун

Конотоп 2020

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є аналоговий електронний вольтметр змінного струму.

Мета роботи полягає у вивченні принципів побудови, характеристик та основних властивостей аналогового електронного вольтметра.

При виконанні роботи використовувалися методи для розрахунку елементів та вузлів пристрою, а також, виконувалися оцінка похибок та розрахунок перетворювача діючих значень даного приладу.

У результаті проведених досліджень встановлено, що в даному курсовому проекті був розроблений електронний вольтметр змінного струму діючого значення, що задовольняє наступні вимоги технічного завдання:

1. Діапазон вимірювання: 1 мВ - 300 В;
2. Діапазон частот: 20 Гц - 200 кГц;
3. Вхідний опір: не менше 2.5 МОм;
4. Вхідна ємність: не більше 10 пФ;
5. Основна похибка: 1.5%.
6. Робочий діапазон температур: 10 - 45 °С;
7. Напруга живлення: 220 В  $\pm$  10%

Робота викладена на 39 сторінках, у тому числі включає 16 рисунків, 1 таблицю, список цитованої літератури із 32 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗМІННИЙ СТРУМ, ЧАСТОТА, НАПРУГА ЖИВЛЕННЯ, ВХІДНА ЄМНІСТЬ, ДІАПАЗОН ВИМІРЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОННИХ ВОЛЬТМЕТРІВ.....	5
1.1 Принцип побудови.....	5
1.2 Характеристики та властивості.....	10
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННОГО ВОЛЬТМЕТРА ЗМІННОГО	13
СТРУМУ.....	
2.1 Розрахунок елементів і вузлів пристрою.....	13
2.2 Розрахунок підсилювача.....	19
2.3 Розрахунок перетворювача діючих значень.....	21
2.4 Оцінка похибок приладу.....	25
РОЗДІЛ 3 ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ВОЛЬТМЕТРІВ.....	30
3.1 Мікрровольтметри.....	30
3.2 Спеціальні прилади для людей з вадами.....	33
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37
ДОДАТКИ	

## ВСТУП

Електронні аналогові вольтметри є одним з перших прикладів електронних вимірювальних приладів. Серед них зустрічаються як вольтметри порівняння так і вольтметри прямого перетворення. Електронним вольтметром називається прилад, показання якого зумовлені струмом електронного приладу, тобто енергією джерела живлення самого вольтметра.[1] Виконується вимірювання напруги, яка керує струмом електронного приладу.

Серед засобів вимірювання напруги велике поширення отримали саме аналогові електронні вольтметри. До їх основних властивостей, можна віднести: широкий діапазон значень та частот, напруг, які вимірюються; високий вхідний опір; слабка залежність показань від частоти вимірюваної напруги; висока чутливість; дуже висока точність вимірювань; малий час встановлення показань; здатність витримувати багаторазові перевантаження; висока надійність; можливість оснащення інтерфейсом КОП.

До недоліків можна віднести такі: порушення градуювання вольтметрів внаслідок старіння; відносну складність електронної схеми; залежність показань від форми напруги; необхідність калібрування (установки на нульову позначку). До основних метрологічних характеристик вольтметрів відносяться: діапазон частот; значення вимірюваної напруги; межі вимірювання; припустима похибка; вхідний опір. [2]

Аналогові електронні вольтметри змінного струму виконуються переважно за двома структурним схемам: детектор-підсилювач і підсилювач-детектор. Вольтметри середньоквадратичних значень забезпечують високу точність вимірювання тиску, та при цьому мають велику кількість гармонійних складових.

Отже, мета даної роботи полягає у вивченні принципів побудови та характеристик аналогового електронного вольтметра, також, було проведено розрахунок електронного вольтметра змінного струм, а саме розрахунок вузлів пристрою, підсилювача та виконано оцінку похибок приладу.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОННИХ ВОЛЬТМЕТРІВ

#### 1.1 Принцип побудови

В електронних вольтметрах конструктивно з'єднані електронний перетворювач і вимірювальний механізм. Електронний перетворювач буває як напівпровідниковим так і ламповим. Вимірювальний механізм зазвичай магніторезистивний. Електронні аналогові вольтметри дозволяють проводити вимірювання в широкому діапазоні напруг і частот. [3]

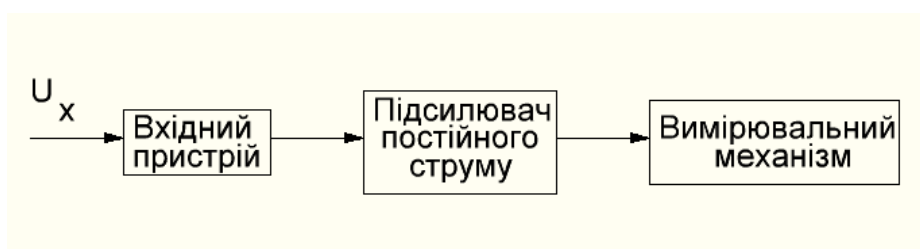


Рис. 1.1. Схема побудови електронного вольтметра постійного струму[3]

Електронні вольтметри постійного струму виконуються по схемі представлений на рис. 1.1.

Вимірювана напруга  $U$ , подається на вхідний пристрій, який являє собою високоомний дільник на резисторах. З дільника напруга поступає на підсилювач постійного струму, а потім – на вимірювальний механізм.

Дільник і підсилювач постійного струму посилюють або послаблюють напругу до значень, що необхідні для забезпечення нормальної роботи вимірювального механізму. Одночасно підсилювач забезпечує гармонію між високим опором вхідного ланцюга прибору з низьким опором котушки вимірювального механізму. Вхідний опір електронного вольтметра складає зазвичай декілька десятків мегаом.[4] Це дозволяє виконувати вимірювання у високоомних ланцюгах з малопомітним споживанням потужності від об'єкта вимірювання. Діапазон вимірюваних напруг постійного струму – від десятків мілівольт до декількох кіловольт.

Електронні вольтметри змінного струму виконуються по двом структурним схемам (рис. 1.2.)

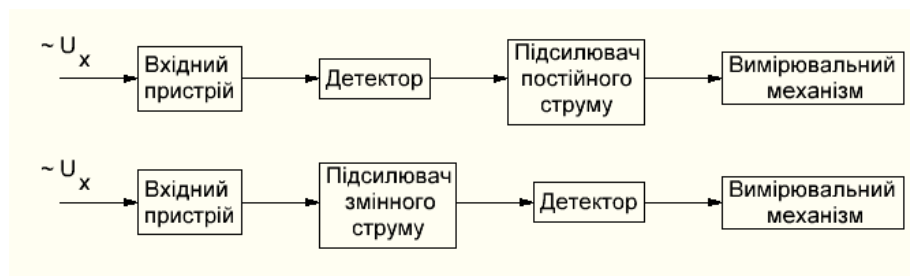


Рис. 1.2. Дві структурні схеми електронних вольтметрів змінного струму[4]

В першій з наведених схем вимірюване значення змінної напруги спочатку перетворюється в постійне з допомогою детектора, а потім підсилюється підсилювачем постійного струму і діє на вимірювальний механізм. В другій наведеній схемі підсилення відбувається на змінному струмі (для цього слугує підсилювач змінного струму) і лише після цього попередньо підсилений сигнал подається на детектор, де випрямляється і відхиляє стрілку вимірювального механізму. Для того, щоб підвищити чутливість вольтметра і привести в дію магнітоелектричний вимірювач використовується підсилювач постійного струму.[5] Його характеризують: постійний коефіцієнт підсилення, лінійність амплітудної характеристики, малий дрейф нуля. Забезпечити лінійність амплітудної характеристики можна правильно задавши режим роботи елементів підсилювача підсилювача. Від'ємний зворотній зв'язок в підсилювачах застосовується для підвищення стабільності коефіцієнту підсилення та покращує лінійність характеристик. Стабілізація напруг живлення також відповідає стабілізації коефіцієнта підсилення. Ці дві схеми доповнюють одна одну. Кожна з них має свої переваги і недоліки. По першій схемі можуть будуватися вольтметри, які мають широкий діапазон частот (10ГЦ-1000МГц), але зазвичай не можуть виміряти напругу менше декілька десятих долей вольт: детектор випрямляє тільки достатньо великі значення напруги.

Друга схема дозволяє будувати чутливі вольтметри з нижньою межею вимірювання - одиниці мікрвольт.[6] Проте такі прилади мають менший частотний діапазон, оскільки частотний діапазон підсилювача змінного струму досить важко зробити достатньо великим. Універсальні ж аналогові електронні вольтметри, дають можливість проводити вимірювання в ланцюгах як змінного так і постійного струму. Принцип побудови показано на рис. 1.3:

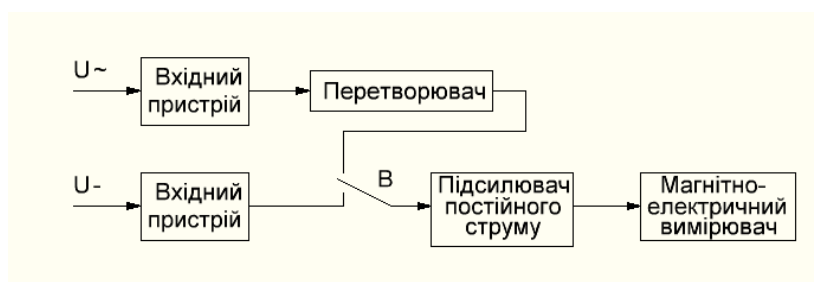


Рис. 1.3. Принцип побудови аналогових електронних вольтметрів[6]

В перетворювачах пікового (амплітудного) значення покази мікроамперметра мають бути пропорційні амплітудному значенню напруги, що вимірюється  $i(t)$ . На рисунках наведені схеми перетворювачів пікового значення відповідно з закритим і відкритим входами. Як бачимо у перетворювачах пікового значення з відкритим входом діод вмикається послідовно з високоомним опором  $R$ . Він також безпосередньо з'єднаний з об'єктом вимірювання. У перетворювача параметри підбираються так ( $R \gg R_{np}$ , опір  $R$  в діапазоні 50 - 100 МОм, ємність  $C$  в діапазоні 0,02 - 0,05 мкФ), щоб через діод (відкритий)  $D$  при опорі  $R_{np}$  при першій позитивній напівхвилі напруги вимірювання високим імпульсом струму здійснювався швидкий заряд ємності  $C$  до визначеного значення напруги  $U_{C1}$  (рис. 1.4.) та його повільний розряд на резистор  $R + R$  з того моменту, як  $i(t) < U_C$ , і при негативній напівхвилі напруги  $i(t)$ . [7] Постійні часу заряду  $R_{np}C$  і розряду  $RC$  пов'язані умовою  $RC \gg R_{np}C$  (опір самого мікроамперметра не враховуємо через його мале значення).

Тимчасові діаграми напруги, що пояснюють роботу пікового перетворювача з відкритим входом  $U(t) = U_m \sin \omega t$  конденсатор  $C$  знову підзарядиться до напруги  $U_C \gg U_{C1}$ . При значенні постійної розряду, багато більшому періоду  $T$  вимірюваної напруги, приблизно через  $(3-4) T$  конденсатор зарядиться до амплітудного значення вимірюваної напруги  $U_m$ , т. е.  $U_C \sim U_m$ . Показання магнітоелектричного мікроамперметра визначаються середнім розрядним струмом  $I_{cp} = I_{та} = U_C / R = U_m / R$ , пропорційним амплітудному значенням вимірюваної напруги.

Тимчасові діаграми напруг, що пояснюють роботу пікового перетворювача з закритим входом представлені на рис. 1.4.

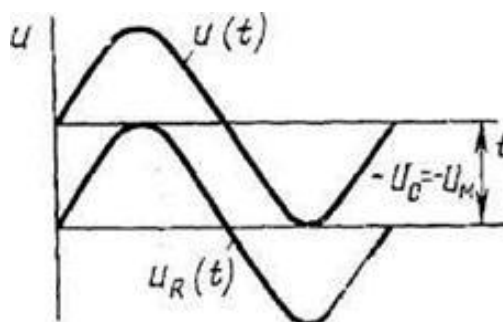


Рис. 1.4. Тимчасові діаграми напруг пікового перетворювача[7]

Якщо вимірювана напруга  $U(t)$ , що подається на вхід перетворювача пікового значення з відкритим входом, містить крім змінної ще й постійну складову, т. е.  $U(t) = U_0 + U_m \sin \omega t$ , то показання мікроамперметра будуть пропорційні сумі  $U_0 + U_m$ .

Велике практичне застосування має перетворювач пікового значення з закритим входом, в якому діод  $D$  включений паралельно високоомного резистору  $R$  (така схема використовується в універсальних аналогових електронних вольтметрах). [8] При позитивній напівхвилі вимірюваної напруги  $U(t) = U_m \sin \omega t$  конденсатор  $C$  заряджається через діод  $D$  опором  $R_{np}$  приблизно до амплітудного значення  $U_m$ , а при негативній напівхвилі вимірюваної напруги діод  $D$  буде замкнений, тому заряджений конденсатор розряджається на резистор  $R$ , але так як постійна часу розряду  $RC$



конденсатора велика в порівнянні з періодом  $T$  вимірюваної напруги, то конденсатор  $C$  не встигає розрядитися за період і напруга на ньому залишається приблизно рівним  $U_m$ .

Шкали більшості вольтметрів незалежно від типу перетворення градуируют в діючих значеннях синусоїдальної сигналу, тому градуювання справедлива тільки при вимірюванні сигналів синусоїдальної форми, за винятком вольтметра зі середньоквадратичним перетворювачем. Електронні вольтметри часто градулюють і у відносних значеннях (Непером і децибелах) з використанням співвідношення  $20 \lg (U / U_0)$ , де  $U_0$  - нульовий рівень по напрузі, що дорівнює 0,775 В на градуювальному опорі в 600 Ом;  $U$  - значення вимірюваної напруги.[9]

У порівнянні з електромеханічними вольтметрами аналогові електронні вольтметри мають такі переваги: широкий частотний діапазон вимірюваної напруги від одиниць герц до сотень мегагерц; слабку залежність показань від частоти вимірюваної напруги в робочому діапазоні частот; високу чутливість, практично постійну в робочому діапазоні частот, широкий динамічний діапазон від десятих часток до сотень вольт (завдяки застосуванню підсилювачів і подільників напруги); мізерно малу потужність споживання, так як мають великий вхідний опір (10-106 МОм), малу вхідну ємність (1-4 пФ) »але в той же час розвивають потужність, достатню для приведення в дію вихідного магнітоелектричного вимірника.

До недоліків аналогових електронних вольтметрів відносять їх порівняно велику основну похибку (1-4%), зумовлену впливом зміни ламп, напівпровідників елементів, інтегральних мікросхем на градуювання вольтметрів, частотну похибку і необхідність допоміжних джерел живлення.

## **1.2 Характеристики та властивості**

Властивості аналогових електронних вольтметрів – це: схема входу, повний вхідний опір, схема перетворювача, характер шкали, чутливість, залежність показань приладу від частоти і форми вимірюваної напруги, межа вимірювань, похибка. [10] Вхідний опір вольтметра складається з реактивної

і активної складових. Активна складова вхідного опору залежить від схеми входу, перетворювача, типу застосовуваного нелінійного елемента, використаного у вхідному конденсаторі діелектрика, і може змінюватися в широких межах. Вхідна ємність електронного вольтметра утворена ємністю вхідних елементів, струмопровідних провідників, міжелектродні ємністю вхідних нелінійних елементів. На високих частотах враховується також індуктивність струмопровідних провідників. Зі збільшенням частоти вхідний опір зменшується, оскільки зменшується опір електричних втрат у вхідному ємності.[9]

Проаналізуємо деякі схемні рішення основних функціональних вузлів, які в основному визначають вимірювальні характеристики аналогових вольтметрів. Ці вузли також використовуються і при побудові інших видів електронних вимірювальних приладів.

Вимірювальний пристрій призначений для того, щоб розширити межі вимірювання вольтметром. У самому простому випадку це атенюатор. Він виконується за резистивною (рис. 1.5, а), ємнісною (рис. 1.5, б) або комбінованою (рис. 1.5, в) схемами.

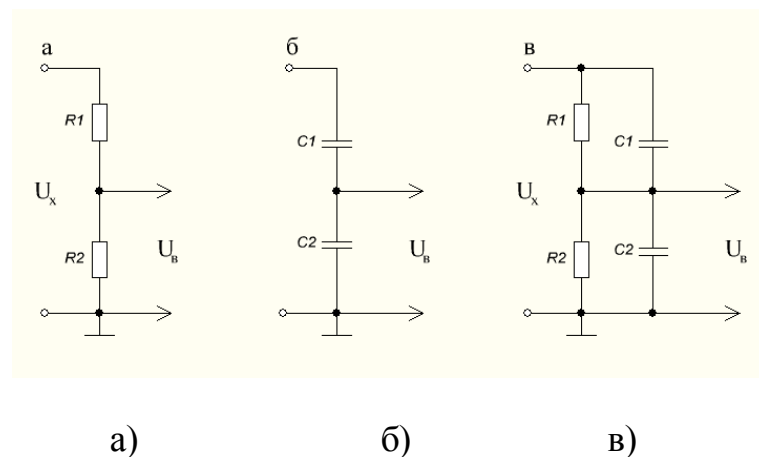


Рис. 1.5. Схеми атенюаторів вольтметрів: а) на резисторах; б) на конденсаторах; в) комбінована[10]

Універсальною і найпростішою є схема, наведена на рис. 1.5, (а). Однак при роботі на високих частотах суттєво будуть впливати паразитні ємності.

Само тому на таких частотах і переходять або до комбінованої схеми, або до ємнісної. [11]

Виконання інших вимог і перш за все забезпечення мінімальної вхідної ємності та високого вхідного опору електронного аналогового вольтметра часто приводить до певного ускладнення структури ВП. Однією з часто вживаних та найбільш універсальна в сучасних електронних вольтметрах змінного струму є ВП, структурну схему якого наведено на рис. 1.6.

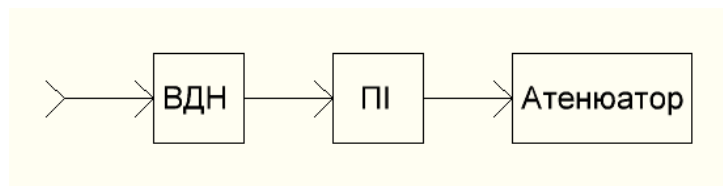


Рис. 1.6. Структурна схема універсального вхідного пристрою[11]

Важливою особливістю цієї схеми являється зміна  $U_v$  за використанням низкоомного резистивного аттенюатора з постійним вхідним і вихідним і вхідним опорами. Це значно підвищить точність вимірювання  $U_x \sim$ , але в свою чергу доведеться ввести в структуру ВП перетворювач (опір) імпедансу (ПІ), що забезпечить зміну високого вхідного опору вольтметра в низький вхідний опір аттенюатора. Як перетворювач імпедансу найчастіше застосовують повторювач напруги, виконаний на польовому транзисторі з глибоким НЗЗ.

Електронні вольтметри найчастіше діляться:[12]

- за призначенням: постійного і змінного струму, імпульсні, фазочутливі, селективні, універсальні;
- за типом відлікового пристрою: аналогові (можливість контролю сталості, більш висока швидкість зчитування показань) і цифрові (високою точністю);
- за методом вимірювання: прямого перевірки мірою і компенсаційного.
- по вимірюється параметрами напруги: амплітудні, середньоквадратичне значення, - по частотному діапазону: НЧ, ВЧ, широкодіапазонні.

Якщо розглянути характеристики аналогових електронних вольтметрів змінного струму, а також характер побудови шкал, то побачимо, що вони визначаються схемою електронного детектора (перетворювача). Як основні, можна виділити перетворювачі середньоквадратичного, пікового, середневипрямленого значень.

Вони перетворюють змінну напругу в постійну, що пропорційно піковому (максимальному), середньоквадратичному, середневипрямленому значенням напруги, що вимірюється. [13]

В таких перетворювачах вхід відносно постійної складової вимірюваної напруги буває або закритим або відкритим. Також аналогові електронні вольтметри змінного струму за частотою поділяються на високочастотні, низькочастотні та надчастотні.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННОГО ВОЛЬТМЕТРА ЗМІННОГО СТРУМУ

Вихідні дані:

Діапазон вимірювання, В:	10-3 – 300;
Діапазон частот, кГц:	0.02 – 200;
Вхідний опір, не менше, МОм:	2.5;
Вхідна ємність, не більше, пФ:	10;
Основна похибка, %:	1.5;
Робочий діапазон температур, °С:	10 – 45;
Напруга живлення, В:	220 - 10 %.

#### 2.1 Розрахунок елементів і вузлів пристрою

Опір вхідного дільника і вхідний опір пристрою повинні бути не менше заданого в технічному завданні значення вхідного опору пристрою ( рис. 2.1), а саме 2,5 МОм.[14]

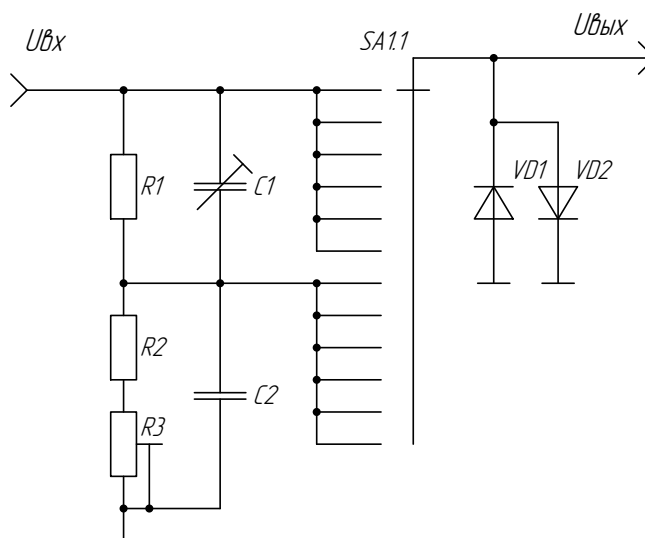


Рис. 2.1. Структурна схема вхідного дільника напруги[14]

З резистора  $R_2$  на вхід перетворювача імпеданса подається напруга  $U_{\text{ВІХ}}$ , складова частина вимірювальної напруги  $U_{\text{ВХ}}$ , задається коефіцієнтом підсилення  $K$ , який дорівнює 0.001, тобто, вхідний дільник розділить вхідну напругу на 1000.

$$K = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_{2\Pi}}{R_1 + R_{2\Pi}}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } R_{2\Pi} = \frac{(R_2 + R_3) \cdot R_{\Pi}}{(R_2 + R_3) + R_{\Pi}};$$

$R_{\Pi}$  – вхідний опір перетворювача імпеданса.  $R_{\Pi} \approx 10^9$  Ом.

Опір  $R_{\Pi} \gg (R_2 + R_3)$ , тому можна вважати, що  $R_{2\Pi} \approx (R_2 + R_3)$ . Для забезпечення потрібного вхідного опору пристрою  $R_{\text{ВХ}}$  необхідне виконання наступні умови:

$$\frac{R_{\text{Д}} \cdot R_{\Pi}}{R_{\text{Д}} + R_{\Pi}} \geq R_{\text{вх}}, \quad (2.2)$$

$$\text{де } R_{\text{Д}} = R_1 + (R_2 + R_3).$$

Виходячи з цього,

$$K = \frac{(R_2 + R_3)}{R_1 + (R_2 + R_3)}. \quad (2.3)$$

Знаючи вхідний опір перетворювача імпеданса і вхідний опір  $R_{\text{ВХ}}$  електронного вольтметра, можна обрахувати  $R_{\text{Д}}$ :

$$R_{\text{Д}} = \frac{R_{\Pi} \cdot R_{\text{вх}}}{R_{\Pi} + R_{\text{вх}}} = \frac{10^9 \cdot 2.5 \cdot 10^6}{10^9 + 2.5 \cdot 10^6} = 2.494 \quad (2.4)$$

Із формул (2.1.2) и (2.1.3) слідує, що

$$(R_2 + R_3) = K \cdot R_{\text{Д}} = 10^{-3} \cdot 2.494 \cdot 10^6 = 2.494 \text{ [кОм]} \quad (2.5)$$

$$R_1 = R_{\text{Д}} - (R_2 + R_3) = 2.494 \cdot 10^6 - 2.494 \cdot 10^3 = 2.492 \text{ [МОм]} \quad (2.6)$$

При роботі дільника напруги із активного опору на змінному струмі, коефіцієнт дільника залежить від частоти в результаті шунтування опорів паразитними ємностями.[15] Для запобігання даної залежності необхідно

здійснити частотну корекцію шляхом шунтування опорів дільника ємністю  $C_1$  и  $C_2$ . При цьому:

$$R_1 \cdot C_1 = R_{2\Pi} \cdot C_{2\Pi}, \quad (2.7)$$

де  $C_{2\Pi} = C_2 + C_\Pi$ ;

$C_\Pi$  – вхідна ємність перетворювача імпеданса.  $C_\Pi \approx 2$  пФ.

Ємність конденсатора  $C_1$ , як правило, виражає вхідну ємність аналогового електронного вольтметра  $C_{\text{вх}}$ . Приймавши  $C_1 \approx C_{\text{вх}}$ , отримаємо  $C_1 = 10$  пФ. Конденсатор  $C_1$  регульований, тому задана в технічному завданні умова про значення вхідної ємності, виконана.

Виходячи із умови (2.1.7), отримаємо значення  $C_2$ :

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot R_1}{R_2 + R_3} - C_\Pi = \frac{10^{-11} \cdot 2.492 \cdot 10^6}{2.494 \cdot 10^3} - 2 \cdot 10^{-12} = 9.989 \text{ [нФ]} \quad (2.8)$$

Діоди VD1 та VD2 (обмежувальні) призначаються для захисту перетворювача імпеданса від перенавантаження по напрузі. Застосуємо діоди Д311 з прямим падінням напруги 0,4 В. Обираємо : [16]

Резистор R1 типу C2-29B-0.25-2.49 МОм  $\pm 0.5\%$

Резистор R2 типу C2-29B-0.25-2.49 кОм  $\pm 0.5\%$

Резистор R3 типу РП1-85А-0.5-240 Ом  $\pm 10\%$

Конденсатор C1 типу КТ4-25-250В-3...15 пФ  $\pm 10\%$

Конденсатор C2 типу К71-6-300В-10 нФ  $\pm 10\%$

Перетворювач імпедансу, схема якого зображена на рис. 2.2, базується на неінвертуючому повторювачі напруги, високий вхідний опір якого є найбільшою його перевагою .[17]

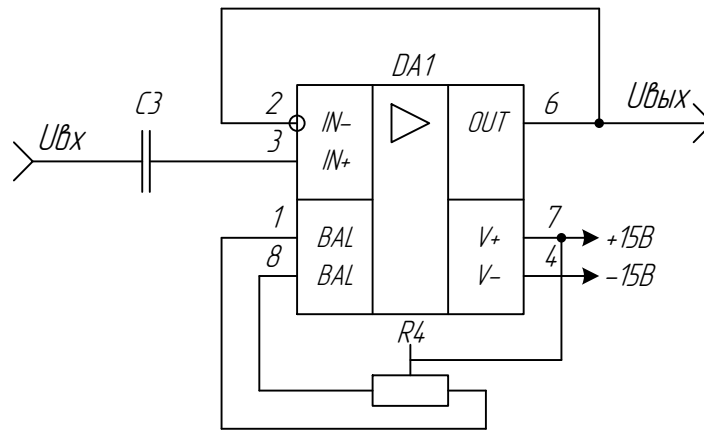


Рис. 2.2. Структурна схема перетворювача імпедансу [17]

Ємність розділового конденсатора  $C_3$  можна розрахувати за формулою:

$$C_3 = (20 \div 50) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{вх}} \cdot f_n} \quad (2.9)$$

За умовами технічного завдання, нижня гранична частота нашого електронного вольтметра має становити 20 Гц, а вхідний опір підсилювача (мікросхема) КР140УД26 дорівнює 1 ГОм, тоді:

$$C_3 = (20 \div 50) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{вх}} \cdot f_n} = 50 \cdot \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 10^9 \cdot 20} = 397.887 \text{ [пФ]} \quad (2.10)$$

З довідника обираємо

Резистор R4 типу РП1-85А-0.5-10 кОм  $\pm 10\%$

Конденсатор C3 типу К71-6-300В-390 пФ  $\pm 10\%$

Атенюатор - це набір однотипних ланок, що являють собою симметричні чотирьохполюсники Т- і П-типів (рис.2.3). Постійність і рівність вихідних і вхідних опорів атенюаторів дає можливість узгодити ланки каналу, через які буде проходити перетворений сигнал.[18] Загасання (коефіцієнт ділення) в атенюаторі можна змінити регулюючи кількість включених ланцюгів (постійні параметрами ланок), або змінити параметри, елементів, які входять в ланку (змінні параметри ланок).



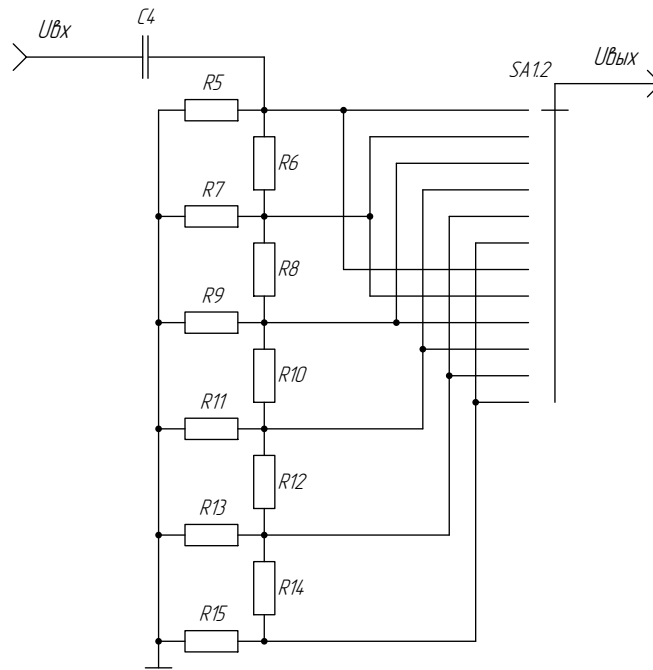


Рис. 2.3. Структурна схема атенюатора[18]

При побудові електронних аналогових вольтметрів застосовують атенюатори з постійними параметрами ланок, а саме - П-подібні чотириполюсники. Приклад подібного атенюатора наведений на рис. 2.4.

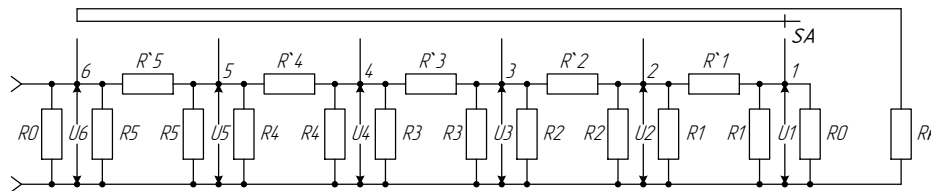


Рис . 2.4. Атенюатори з постійними параметрами ланок[18]

Коефіцієнт затухання чотириполюсника  $K_i$  визначається як відношення вхідної напруги  $U_i$  до вихідної  $U_{i+1}$ :

$$K_i = \frac{U_i}{U_{i+1}}. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт затухання  $K$  атенюатора визначається як добуток коефіцієнтів затухання чотириполюсників:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n, \quad (2.12)$$

де  $n$  – число чотирьохполюсників.

Значення коефіцієнту затухання  $i$ -ної ланки  $K_i$  знаходиться за наступною формулою:

$$K_i = \frac{U_i}{U_{i+1}} = \frac{\frac{R_i \cdot R_0}{R_i + R_0}}{R_i + \frac{R_i \cdot R_0}{R_i + R_0}} \quad (2.13)$$

Опір частини схеми, розташованої від точки 1 зліва, відповідно до теорії атенюаторів, дорівнює  $R_0$ :

$$R_0 = \frac{R_i \cdot \left[ R_i' + \frac{R_i \cdot R_0}{R_i + R_0} \right]}{R_i + R_i' + \frac{R_i \cdot R_0}{R_i + R_0}} \quad (2.14)$$

Розв'язавши рівняння, маємо:

$$R_i = R_0 \cdot \frac{1 + K_i}{1 - K_i}, \quad (2.15)$$

$$R_i' = R_0 \cdot \frac{1 - K_i^2}{2 \cdot K_i} \quad (2.16)$$

Якщо аттенюатор працюватиме на навантаження  $R_H$ , опір якого нескінченно великий, приймають вірним рівність  $R_0 = R_H$ .

Діапазон вимірювання напруги електронного аналогового вольтметра має бути від 1 мВ до 300 В. Визначимо коефіцієнти загасання, число ступенів атенюатора та число меж вимірювань,[19]

Співвідношення номінальних напруг двох сусідніх меж вимірювань обираємо рівним  $a = \sqrt{10}$ .

Отримали 12 меж вимірювання,(наведені в таб.2.1):

Таблиця 2.1

**Діапазони меж вимірювання[19]**

№ межі	Значення, мВ	№ межі	Значення, В
1	0 – 1	7	0 – 1
2	0 – 3.16	8	0 – 3.16
3	0 – 10	9	0 – 10
4	0 – 31.6	10	0 – 31.6
5	0 – 100	11	0 – 100
6	0 – 316	12	0 – 316

Опираючись на встановлені межі вимірювання каналового електронного вольтметра та коефіцієнт ділення вхідного дільника, напруги на ступенях загасання атенюатора  $U_i$  будуть відповідно рівні:  $U_1 = 1$  мВ;  $U_2 = 3.16$  мВ;  $U_3 = 10$  мВ;  $U_4 = 31.6$  мВ;  $U_5 = 100$  мВ;  $U_6 = 316$  мВ.

В залежності із співвідношенням (2.1.11) маємо:

$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = \frac{1}{\sqrt{10}} = 0.316 \quad .(2.17)$$

Тоді із формул (2.1.15) та (2.1.16) маємо:

$$R_i = R_0 \cdot \frac{1 + K_i}{1 - K_i} = R_0 \cdot \frac{1 + 0.316}{1 - 0.316} = 1.925 \cdot R_0 \quad (2.18)$$

$$R'_i = R_0 \cdot \frac{1 - K_i^2}{2 \cdot K_i} = R_0 \cdot \frac{1 - 0.316^2}{2 \cdot 0.316} = 1.423 \cdot R_0 \quad .(2.19)$$

Паралельно з'єднані резистори замінемо одним:

$$R_{01} = \frac{R_0 \cdot R_1}{R_0 + R_1}; \quad R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3};$$

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}; \quad R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}; \quad R_{50} = \frac{R_5 \cdot R_0}{R_5 + R_0}. \quad (2.20)$$

Визначаємо опори резисторів аттенюатора (вхідний опір підсилювача нам відомий та приймемо  $R_0 = R_n = 20 \text{ кОм}$ ) за формулами (2.15) і (2.16) визначимо параметри опорів аттенюатора:

$$R_5 = R_{15} = \frac{1.925}{1.925 + 1} \cdot R_0 = 0.658 \cdot 20 \cdot 10^3 = 13.18 \text{ [кОм]}; \quad (2.21)$$

$$R_6 = R_8 = R_{10} = R_{12} = R_{14} = 1.423 \cdot R_0 = 1.423 \cdot 20 \cdot 10^3 = 28.43 \text{ [кОм]}; \quad (2.22)$$

$$R_7 = R_9 = R_{11} = R_{13} = \frac{1.925^2}{2 \cdot 1.925} \cdot R_0 = 0.963 \cdot 20 \cdot 10^3 = 19.25 \text{ [кОм]}. \quad (2.23)$$

Особливістю аттенюаторів є те, що в незалежності від положення перемикача, вхідний і вихідний опори постійні і рівні  $R_0$ . [20]

Ємність розділового конденсатора  $C_4$  розрахуємо за формулою:

$$C_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot f_n} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 20} = 397.887 \text{ [нФ]} \quad (2.24)$$

## 2.2 Розрахунок підсилювача

Підсилювач змінної напруги складається з двох каскадів, які виконані на операційному підсилювачі типу ОР37, зображено на рис.2.5.

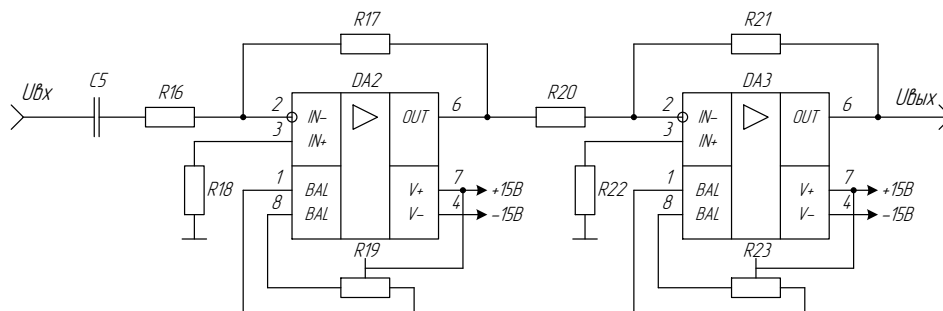


Рис.2.5. Структурна схема підсилювача змінної напруги[20]

Коефіцієнт підсилення вибираємо опираючись на величину струму відхилення стрілки вимірювального механізму та максимальне значення вхідної напруги.

У даному пристрої застосуємо механізм вимірювальний типу М2027-М1. Даний прилад має величину внутрішнього опору 3 кОм та величину струму максимального відхилення стрілки 100 мкА.

Для того, щоб зменшити вплив температури послідовно з вимірювальним механізмом ставиться додатковий резистор, номінальне значення якого в 5 ... 10 разів більше його внутрішнього опору. В розрахунку приймемо  $R_{доб} = 15 \text{ кОм}$ . [21]

Для того, щоб отримати повне відхилення стрілки ВМ, потрібно подати напругу, яка обраховується за формулою:

$$U_{\max} = I_{\max} \cdot (R_{доб} + R_{вн}) = 100 \cdot 10^{-6} \cdot (15 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^3) = 1.8 \text{ [В]} \quad (2.25)$$

Максимальна напруга на вході підсилювача рівна 1 мВ. Виходячи з цього загальний  $K_{\Pi} = 1800$ . Приймемо коефіцієнт посилення першого каскаду  $K_1 = 40$ , а коефіцієнт посилення другого каскаду  $K_2 = 45$ . Приймемо  $R_{16}$  і  $R_{20}$  рівними 20 кОм, тоді:

$$R_{17} = K_1 \cdot R_{16} = 40 \cdot 20 = 800 \text{ [кОм]} \quad (2.26)$$

$$R_{21} = K_2 \cdot R_{20} = 45 \cdot 20 = 900 \text{ [кОм]} \quad (2.27)$$

Номінали резисторів  $R_{18}$  та  $R_{22}$  розрахуємо по формулам:

$$R_{18} = \frac{R_{16} \cdot R_{17}}{R_{16} + R_{17}} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 800 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 800 \cdot 10^3} = 19.51 \text{ [кОм]} \quad (2.28)$$

$$R_{22} = \frac{R_{20} \cdot R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 900 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 900 \cdot 10^3} = 19.57 \text{ [кОм]} \quad (2.29)$$

Ємність конденсатора  $C_5$  (розділового) обрахуємо за формулою:

$$C_5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{16} \cdot f_n} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 20} = 397.887 \text{ [нФ]} \quad (2.30)$$

### 2.3 Розрахунок перетворювача діючих значень

Перетворювачі діючих значень напруг реалізуються з використанням двох методів: з використанням логарифмічних-антилогарифмічних

пристроїв, але такий перетворювач вийде доволі складним і має низьку точність. Найчастіше користуються другим методом.[22]

Структурна схема перетворювача діючих значень включає в себе пристрій виділення модуля (ПВМ), квадратичний функціональний перетворювач (КФП), усереднюючого пристрою (УП) та функціональний перетворювач, який здійснює витяг кореня квадратного ( $\sqrt{x}$ ) (рис. 2.6).

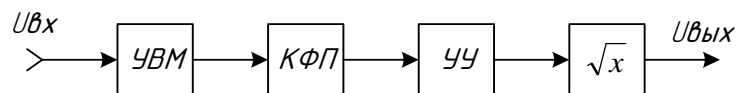


Рис. 2.6. Структурна схема перетворювача діючих значень, (ПВМ) пристрій виділення модуля, (КФП) квадратичний функціональний перетворювач, (УП) усереднюючого пристрою та функціональний перетворювач який здійснює витяг кореня квадратного ( $\sqrt{x}$ )[22]

Як ПВМ вхідної напруги можна використовувати пасивні або активні перетворювачі середніх значень заданого перетворювача.

Як квадратичний функціональний перетворювач використовують в основному функціональні перетворювачі, термоелектричні перетворювачі і терморезисторні з заданою нелінійністю характеристик і кусочно-лінійною апроксимацією параболи.

Як підсилювальний пристрій використовують пасивні та активні фільтри нижніх частот.

В нашому проекті функціональний перетворювач виконано на основі множниково-дільного пристрою, схема даного пристрою, приведена на рис. 2.6.

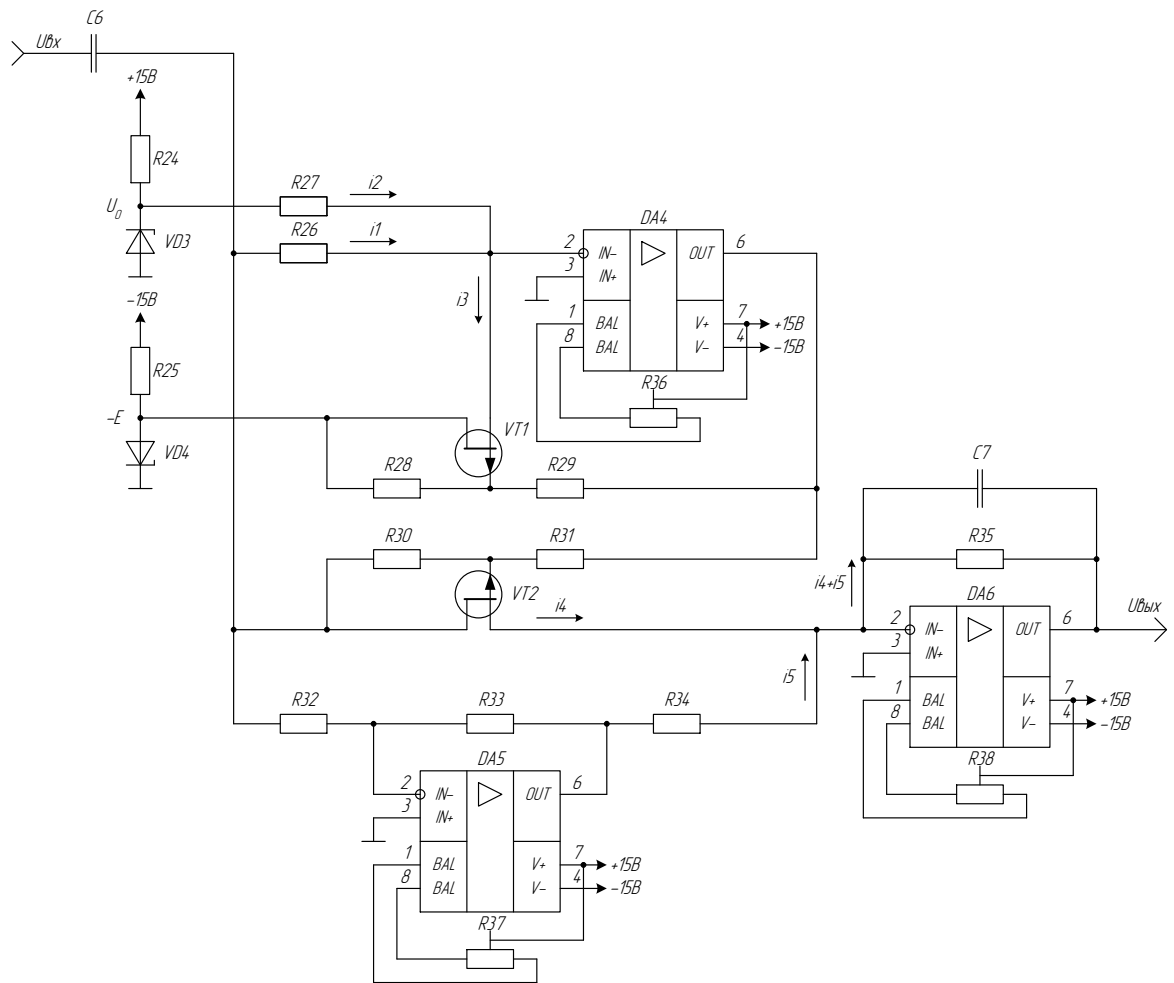


Рис. 2.7. Схема множнково-дільникового пристрою[22]

Множнково-дільниковий пристрій включає підсилювач неузгодженості на ОП DA4, два польових транзистори VT1 і VT2, які розташовані в одному корпусі, перетворювача напруга-струм на підсилювачі DA5, перетворювач струм-напруга на підсилювачі DA6 та два джерела живлення.

Модуль напруги стабілізації стабілітронів 2С156В VD3 та VD4  $U_{ст} = 5.6$  В, а струм стабілізації  $I_{ст} = 5$  мА. Виходячи з цього номінали опорів  $R_{24}$  та  $R_{25}$  можна визначити по формулі:

$$R_{24} = R_{25} = \frac{|U_n - U_{cm}|}{I_{cm}} = \frac{|15 - 5.6|}{5 \cdot 10^{-3}} = 1880 \quad [\text{Ом}] \quad (2.31)$$

Значення напруг  $U_0$  и  $E$  дорівнюють відповідно  $+5.6$  В та  $-5.6$  В.

Вихідна напруга DA4 керує провідністю каналів транзисторів VT1 і VT2 так, щоб зберігалась напруга на його інвертуючому виході близькою до нуля. При цьому  $i_1 + i_2 = i_3$ . Звідки:

$$\frac{U_{\text{ex}}}{R_{26}} + \frac{U_0}{R_{27}} = E \cdot g_1 \quad (2.32)$$

Через те, що маємо ідентичні характеристики транзисторів VT1 та VT2, то й провідності їх каналів також рівні ( $g_1 = g_2$ ), а отже:

$$i_4 = U_{\text{ex}} \cdot g_2 = \frac{U_{\text{ex}}}{E} \left( \frac{U_{\text{ex}}}{R_{26}} + \frac{U_0}{R_{27}} \right) \quad (2.33)$$

Вихідний струм  $I_5$  перетворювача за виконання умови:

$$\frac{R_{32} \cdot R_{34}}{R_{33}} = R_{27} \cdot \frac{E}{U_0} \quad (2.34)$$

Дорівнює:

$$i_5 = -U_{\text{ex}} \cdot \frac{R_{33}}{R_{32} \cdot R_{34}} \quad (2.35)$$

Постійна складова напруги на виході DA6 має дорівнювати:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{T_0} \int_0^T (i_4 + i_5) R_{35} dt = \frac{R_{35}}{R_{26} \cdot E} \cdot U_{\text{ex}}^2 \quad (2.36)$$

Резистор  $R_{26}$  обирається виходячи із мінімального опору навантаження для джерела вхідного сигналу  $U_{\text{вх}}$ . [23] Оскільки дуже часто замість нього використовують електронні підсилювачі, то значення  $R_{26}$  цілорозумно обирати  $10$  кОм. Резистор  $R_{32}$  обраємо ідентичним резистору  $R_{26}$ . Суттєво збільшувати значення резистору  $R_{26}$  не слід, так як кращий результат можна отримати при великих струмах  $I_1, I_2, I_3$  (вони не повинні перевищувати  $1$  мА). Отже, обираючи  $R_{26}$  потрібно спиратися на виконання нерівності:

$$\frac{2 \cdot U_{\text{ex max}}}{R_{26}} < 10^{-3} \quad [\text{A}]; \quad (2.37)$$

$$R_{26} \parallel R_{32} > R_{\text{дон}}, \quad (2.38)$$



де  $R_{\text{доп}}$  – мінімальне значення опору навантаження джерела вхідного сигналу.

Максимально вихідна напруга підсилювача дорівнює 3В. Із нерівності (2.3.7) маємо, що  $R_{26} > 6 \text{ кОм}$ . Приймаємо значення резистора  $R_{32}$  рівним значенню резистора  $R_{26}$ , із нерівності (2.3.8) отримаємо, що  $R_{26} > 2 \cdot R_{\text{доп}}$ . Для підсилювача КР140УД26 мінімальний опір навантаження дорівнює 2 кОм. Відповідно,  $R_{26} > 2 \cdot 2 \cdot 10^3 = 4 \text{ кОм}$ .

Значення резистора  $R_{27}$  оберемо, виходячи із наступних умов:

$$\frac{U_0}{R_{27}} = E \cdot g_{1\min}, \quad (2.39)$$

$$\frac{U_{\alpha\max}}{R_{26}} + \frac{U_0}{R_{27}} = E \cdot g_{1\max}, \quad (2.310)$$

де  $g_{1\max}$  та  $g_{1\min}$  – максимальне та мінімальне значення провідності «каналу» польового транзистора.

Для подавлення змінної складової вихідної напруги в ланцюзі підсилювача DA6 включений конденсатор  $C_7$ , який обирається виходячи із потрібної верхньої частоти полоси пропускання  $w_B$ :

$$w_B = \frac{1}{\tau}, \quad (2.41)$$

де  $\tau = R_{35} \cdot C_7$ .

$$C_7 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot R_{35}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 37333} = 12.787 \text{ [пФ]} \quad (2.42)$$

Ємність роздільного конденсатора  $C_6$  розрахуємо за формулою:

$$C_6 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{26} \parallel R_{32} \cdot f_H} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 20} = 795.775 \text{ [нФ]} \quad (2.43)$$

## 2.4 Оцінка похибки приладу

Спочатку виконаємо розрахунок похибки вхідного дільника. Відносна похибка коефіцієнта дільника  $K$  при зміні опорів знаходиться так:

$$\delta = \frac{\Delta K}{K} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (\delta_1 + \delta_2), \quad (2.44)$$

$$\text{де } \delta_1 = \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot 100\% + \delta_{R1} = \frac{2.492 \cdot 10^6 - 2.49 \cdot 10^6}{2.49 \cdot 10^6} \cdot 100 + 0.5 = 0.58\% ;$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta R_2}{R_2} \cdot 100\% + \delta_{R2} = \frac{2.494 \cdot 10^3 - 2.49 \cdot 10^3}{2.49 \cdot 10^3} \cdot 100 + 0.5 = 0.66\%$$

Відповідно, із (2.4.1) отримаємо:

$$\delta_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (\delta_{R1} + \delta_{R2}) = \frac{2.49 \cdot 10^3}{2.49 \cdot 10^6 + 2.49 \cdot 10^3} \cdot (0.58 + 0.66) = 0.001\% \quad (2.45)$$

Дана похибка усувається за допомогою підлаштування резистора  $R_3$  і її можна не враховувати.

Наступною розрахуємо похибку перетворювача імпеданса. [24] В якості даного перетворювача застосовується неінвертуючий підсилювач, коефіцієнт підсилення якого залежить від частоти і визначається по формулі:

$$K(j\omega) = \frac{K_{y.u}(j\omega)}{1 + K_{y.u}(j\omega) \cdot \gamma}, \quad (2.46)$$

де  $K_{y.u}$  – функція коефіцієнта підсилення мікросхеми операційного підсилювача;

$\gamma = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  – коефіцієнт операційної системи. Оскільки підсилювач увімкнений по схемі повторювача напруги, то  $R_1 = \infty$ , а  $R_2 = 0$ .

Відповідно, із нерівності (2.41)  $\gamma = 1$ .

Згідно з графіком залежності коефіцієнта підсилення підсилювача від частоти, визначаємо значення коефіцієнта підсилення на граничних частотах.  $K_{y.u}(20 \text{ Гц}) = 10^6$ ,  $K_{y.u}(200 \text{ кГц}) = 10^4$ .

$$K(20) = \frac{K_{y.u}(20)}{1 + K_{y.u}(20)} = \frac{10^6}{1 + 10^6} = 1, \quad (2.47)$$

$$K(200000) = \frac{K_{y.u}(200000)}{1 + K_{y.u}(200000)} = \frac{10^4}{1 + 10^4} = 0.9999, \quad (2.48)$$

Похибку перетворювача імпеданса можна визначити по формулі:

$$\delta_{III} = \frac{1 - K(200000)}{K(200000)} \cdot 100\% = \frac{1 - 0.9999}{0.9999} \cdot 100\% = 0.01\% \quad (2.49)$$

Виконаємо розрахунок похибки атенюатора. Відносна похибка  $j$ -тої ланки знаходиться по формулі:

$$\delta_j = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{(i+1)n}} \cdot (\delta_i + \delta_{i+1}), \quad (2.50)$$

де  $\delta_i = \delta_{ip} + \delta_{in}$  – суммарна відносна похибка резистора  $R_i$ ;

$\delta_{i+1} = \delta_{(i+1)p} + \delta_{(i+1)n}$  – суммарна відносна похибка резистора  $R_{i+1}$ ;

$\delta_{ip}, \delta_{(i+1)p}$  – відносна похибка, яка виникла в результаті неспівпадання розрахункового і номінальних значень відповідних резисторів  $R_{ip}, R_{(i+1)p}$ ;

$\delta_{in}, \delta_{(i+1)n}$  – допустиме відхилення номінальних опорів резисторів  $R_{in}, R_{(i+1)n}$ .

Абсолютні величини відносної похибки, які виникають в результаті неспівпадання розрахункового і номінальних значень резисторів  $R_i$  та  $R_{i+1}$ , знаходяться за формулами:

$$\delta_{ip} = \frac{\Delta R_i}{R_{in}} \cdot 100\%, \quad (2.51)$$

$$\delta_{(i+1)p} = \frac{\Delta R_{i+1}}{R_{(i+1)n}} \cdot 100\%, \quad (2.52)$$

де  $\Delta R_i = R_{ip} - R_{in}$  – абсолютне значення похибки опору  $R_i$ ;

$\Delta R_{i+1} = R_{(i+1)p} - R_{(i+1)n}$  – абсолютне значення похибки опору  $R_{i+1}$ ;

$R_{ip}, R_{(i+1)p}$  – розрахункові значення опорів резисторів  $R_i, R_{i+1}$ ;

$R_{in}, R_{(i+1)n}$  – номінальні значення опорів резисторів  $R_i, R_{i+1}$ .

Знайдемо сумарні похибки резисторів:

$$\delta_{R5} = \delta_{R15} = \frac{13.2 \cdot 10^3 - 13.18 \cdot 10^3}{13.2 \cdot 10^3} \cdot 100 + 0.1 = 0.25\% , \quad (2.53)$$

$$\delta_{R6} = \delta_{R8} = \delta_{R10} = \delta_{R12} = \delta_{R14} = \frac{28.43 \cdot 10^3 - 28.4 \cdot 10^3}{28.4 \cdot 10^3} \cdot 100 + 0.1 = 0.21\%$$

$$\delta_{R7} = \delta_{R9} = \delta_{R11} = \delta_{R13} = \frac{19.3 \cdot 10^3 - 19.27 \cdot 10^3}{19.3 \cdot 10^3} \cdot 100 + 0.1 = 0.26\% . \quad (2.54)$$

Знайдемо відносні похибки для кожної ланки:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{R_{14H}}{R_{14H} + R_{15H}} \cdot (\delta_{14} + \delta_{15}) = \frac{28.4 \cdot 10^3}{28.4 \cdot 10^3 + 13.2 \cdot 10^3} \cdot (0.21 + 0.25) = 0.31\% \\ \delta_2 &= \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \frac{R_{12H}}{R_{12H} + R_{13H}} \cdot (\delta_{12} + \delta_{13}) = \\ &= \frac{28.4 \cdot 10^3}{28.4 \cdot 10^3 + 19.3 \cdot 10^3} \cdot (0.21 + 0.26) = 0.28\% \end{aligned} \quad (2.55)$$

Відносна похибка атенюатора дорівнює:

$$\delta_{AT} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2} = \sqrt{0.31^2 + 4 \cdot 0.28^2} = 0.64\% \quad (2.56)$$

Виконаємо розрахунок похибок підсилювача. Його коефіцієнт підсилення залежить від частоти і заходиться за формулою:

$$K(j\omega) = \frac{\mu \cdot K_{y.u}(j\omega)}{1 + K_{y.u}(j\omega) \cdot \gamma} , \quad (2.57)$$

де  $K_{y.u}$  – функція коефіцієнта підсилення мікросхеми операційного підсилювача;

$$\gamma = \frac{R_1}{R_1 + R_2} ;$$

$$\mu = \frac{R_2}{R_1 + R_2} .$$

По графіку залежності коефіцієнта підсилення операційного підсилювача від частоти визначаємо значення коефіцієнта підсилення на граничних частотах.  $K_{y.u}(20 \text{ Гц}) = 10^6$ ,  $K_{y.u}(200 \text{ кГц}) = 10^4$ . [25]

Визначаємо похибки для першого каскаду підсилювача.

$$\mu_1 = \frac{R_{17}}{R_{16} + R_{17}} = \frac{806 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 806 \cdot 10^3} = 0.976, \quad (2.58)$$

$$\gamma_1 = \frac{R_{16}}{R_{16} + R_{17}} = \frac{20 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 806 \cdot 10^3} = 0.024, \quad (2.59)$$

$$K_1(20) = \frac{\mu_1 \cdot K_{y.u}(20)}{1 + K_{y.u}(20) \cdot \gamma_1} = \frac{0.975 \cdot 10^6}{1 + 10^6 \cdot 0.025} = 40.134, \quad (2.60)$$

$$K_1(200000) = \frac{\mu_1 \cdot K_{y.u}(200000)}{1 + K_{y.u}(200000) \cdot \gamma_1} = \frac{0.975 \cdot 10^4}{1 + 10^4 \cdot 0.025} = 40.098, \quad (2.61)$$

$$\delta_1 = \frac{K_1 - K_1(20)}{K_1} \cdot 100 = \frac{40.134 - 40}{40} \cdot 100 = 0.335\%, \quad (2.62)$$

Визначаємо похибки для другого каскаду підсилювача.

$$\mu_2 = \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{898 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 898 \cdot 10^3} = 0.978, \quad (2.63)$$

$$\gamma_2 = \frac{R_{20}}{R_{20} + R_{21}} = \frac{20 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3 + 898 \cdot 10^3} = 0.022, \quad (2.64)$$

$$K_2(20) = \frac{\mu_2 \cdot K_{y.u}(20)}{1 + K_{y.u}(20) \cdot \gamma_2} = \frac{0.978 \cdot 10^6}{1 + 10^6 \cdot 0.022} = 44.988, \quad (2.65)$$

$$K_2(200000) = \frac{\mu_2 \cdot K_{y.u}(200000)}{1 + K_{y.u}(200000) \cdot \gamma_2} = \frac{0.978 \cdot 10^4}{1 + 10^4 \cdot 0.022} = 44.798, \quad (2.66)$$

$$\delta_2 = \frac{K_2 - K_2(200000)}{K_2} \cdot 100 = \frac{45 - 44.798}{45} \cdot 100 = 0.449\%, \quad (2.67)$$

Обрахуємо похибку підсилювача:

$$\delta_y = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = \sqrt{0.335^2 + 0.449^2} = 0.56\%, \quad (2.68)$$

Розрахуємо основну похибку приладу.

Дана похибка визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt{\delta_D^2 + \delta_{III}^2 + \delta_{AT}^2 + \delta_y^2 + \delta_{ПДЗ}^2 + \delta_{ИМ}^2} = \\ &= \sqrt{0.001^2 + 0.01^2 + 0.64^2 + 0.56^2 + 1.12^2 + 0.5^2} = 1.493\% \end{aligned} \quad (2.69)$$

Розраховане значення основної похибки приладу повністю задовольняє вимогам технічного завдання (не більше 1.5 %).

У результаті проведених досліджень встановлено, що в даному курсовому проекті був розроблений електронний вольтметр змінного струму діючого значення, що задовольняє наступні вимоги технічного завдання:

1. Діапазон вимірювання: 1 мВ - 300 В;
2. Діапазон частот: 20 Гц - 200 кГц;
3. Вхідний опір: не менше 2.5 МОм;
4. Вхідна ємність: не більше 10 пФ;
5. Основна похибка: 1.5%.
6. Робочий діапазон температур: 10 - 45 °С;
7. Напруга живлення: 220 В  $\pm$  10%

## РОЗДІЛ 3

### ЗАСТОСУВАННЯ АНАЛОГОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ ВОЛЬТМЕТРІВ

#### 3.1 Мікрровольтметри

Виміри і визначення малих і надмалих значень змінної напруги є досить актуальним в різних сферах науки і техніки: космічні дослідження, сейсмологія, гідроакустика та ін. Мікрровольтметри також використовують для перевірки атенюаторів, підвищення точності вимірів у метрології, тощо. Всі сучасні методи підвищення чутливості вхідних підсилювачів використовується при розробці мікро і нановольтметрів. Всі ці методи поділяються на дві групи: структурно-алгоритмічні та конструктивно-технологічні.[26] Перші методи: - забезпечують зменшення похибок від діючих завад і спираються на організацію додаткових зв'язків у обробці сигналів та засобах вимірювань (якщо є внутрішні шуми, то на виході вони майже непомітні).

Друга група:- використання низькошумних активних та пасивних елементів (транзисторів, резисторів, ламп з холодним катодом, конденсаторів, і т. п.); - застосування зміни режимів роботи підсилювачів, щоб максимально мінімізувати рівень їх шуму; - охолодження схем підсилювачів, використання нових елементів при їх побудові; - удосконалення блоку живлення майже до використання гальванічних елементів; - застосування фільтрів, екранів, звуження смуги частоти каналів мікрровольтметра, орієнтування схем відносно до джерела завад та ін. Ефективний і найпростіший спосіб підвищити чутливість – застосовувати схему з симетричним входом мікрровольтметра.[27]

Іншим способом щоб підвищити чутливість мікрровольтметрів являється використання ОП або диференційних підсилювачах змінної напруги. Так як, у диференційних підсилювачах коефіцієнт зниження симетричних завад дуже високий ( $\approx 100\text{дБ}$ ) то це також дає можливість будувати широкосмугові підсилювачі з високою завадостійкістю. Третій спосіб - є паралельне вмикання каналів перетворення (широкосмугових підсилювачів).

Як приклад на рис. 3.1 наведені фотографії деяких сучасних аналогових електронних вольтметрів, а саме: мікровольтметра ВЗ-57 (рис. 3.1, а) і мілівольтметра АВМ-1071 (рис. 3.1,б). Мікровольтметр ВЗ-57 має наступні технічні характеристики: межа вимірювань в межах від 0,01 мВ до 300 В; частотний діапазон в межах від 5 Гц до 5 МГц; клас точності залежить від межі вимірювань і може бути від 1 до 4; вхідний опір/ємність становить 5 МОм/27 пФ, споживана потужність 20 ВА. Характеристики мілівольтметра АВМ-1071: межа вимірювань в діапазоні від 300 мкВ до 100 В; діапазон робочих частот в межах від 10 Гц до 2 МГц; похибка вимірювань становить  $\pm 3\%$  (відносно 1 кГц).



Рис. 3.1. Мікровольтметр ВЗ-5( а) і мілівольтметра АВМ-1071 (б) [27]

В наш час широкого розповсюдження мають аналогові електронні вольтметри, принцип роботи більшості з них заснований на вимірюванні напруги послаблення або посилення і перетворення її в іншу фізичну величину.

Основні частини таких вольтметрів: роздільники напруги та підсилювачі змінного струму. Аналогічні методи перетворення змінного струму застосовуються як в аналогових електронних вольтметрах змінного струму, так і в цифрових вольтметрах. Зазвичай такі аналогові методи дають можливість перетворювати змінний струм в напругу постійного струму за допомогою перетворювачів змінного струму. [28]



В залежності від типу перетворювача змінного та постійного струму, напруга постійного струму може бути пропорційною середньому або піковим значенням змінного струму.

Перетворювачі можуть бути:

- середні перетворювачі змінного та постійного струму (напівхвильові або повнохвильові випрямлячі);
- перетворювачі змінного та постійного струму;
- пікові перетворювачі змінного та постійного струму (пікові детектори).

Не так давно вольтметри змінного струму були розроблені за методом відбору конверсія - синхронна або випадкова вибірка. Такі способи конверсії застосовуються як в аналогових вольтметрах змінного струму, так і в цифрових. Аналоговий Millivoltmeter 9301A зображений на рис. 3.2 і RF Digital Millivoltmeter 9303 Racal-Data.

Існує інший метод, який називається методом випадкового відбору, даний метод і використовується. Інший приклад - у Hewlett Packard 3458A, зображений на рис. 3.3, в якому використовується мультиметр, та використовується три методи перетворення: метод випадкового відбору, аналоговий метод та синхронної вибірки.



Рис. 3.2. Аналоговий Millivoltmeter 9301A[28]



Рис.3.3. Аналоговий Hewlett Packard 3458A[28]

### 3.2 Спеціальні прилади для людей з вадами

В наш час широко застосовуються спеціальні високотехнологічні програми для людей, які мають проблеми із зором, тобто якраз для перевірки саме таких приладів і використовуються аналогові електронні вольтметри. Ці пристрої надають інформацію, яку користувачі в іншому випадку читатимуть на візуальному дисплеї. Наприклад, компас може надавати користувачеві цифрові зворотні відгуки англійською, іспанською, французькою або німецькою мовами. Доступна комбінація декількох пристроїв у межах одного пристрою. [29] Для прикладу, голосові щоденники містять календар зустрічей, годинник, калькулятор розмови, список телефонів та вихідний сигнал на одному невеликому портативному пристрої.

Людина з обмеженими можливостями може підвищити незалежність у громаді через системи аудіовивісок. Ці системи розширюють для користувача різні функції - від слухових звукових сигналів до усних описів чи інструкцій через карманний приймач. Одним із поширених прикладів є використання звукових сигналів на дорожніх сигналах, які сповіщають сліпого пішохода при безпечному переході вулиці. Більш досконалі системи

можуть бути встановлені в приватних офісах, громадських будівлях, торгових центрах або парках. Використовуючи інфрачервоні або чутливі до руху функції, людина, яка є сліпою, отримає словесне повідомлення, яке визначає місцезнаходження будівлі, офісного набору, фонтану з водою чи ліфта.

Наразі громадськість може отримувати орієнтацію на навколишнє середовище через систему, яка дає словесні вказівки, використовуючи глобальний супутниковий пристрій позиціонування (GPS). Однак сліпа людина не може отримати доступ до цих систем самостійно, оскільки виробники спроектували їх для прозорливих водіїв для отримання вказівок по черзі. Однак виробники модифікували GPS-пристрої для незрячих користувачів. Адаптована система GPS дає вказівкам для незрячих користувачів дістатися певного місця за допомогою програмного забезпечення для орієнтації, програми зчитування графічного екрана та синтезатора мови.[30]

Станції PBS надають описову відео-послугу (DVS) для різних телевізійних програм. Вони дають описові описи основних візуальних елементів програми, не змінюючи звукових звуків чи діалогів. Сюди входять описи візуальних елементів, таких як дії, субтитри, зміни сцени, графіки та мови тіла. Ця послуга також доступна для деяких фільмів на домашньому відео. Глядач повинен мати стерео-телевізор або стерео-відеомагнітофон з другим каналом аудіопрограми (SAP) для отримання DVS.

Сліпі люди можуть читати матеріали для друку використовуючи оптичний зчитувач символів (OCR). У відеомагнітофони входять ручні пристрої або планшетні сканери, які перетворюють друковане слово в комп'ютерний файл, синтезують мовлення та / або роздруківку шрифтом Брайля. Окремі OCR також доступні, і люди, які не є грамотними комп'ютером, можуть віддати перевагу.

Люди з вадами зору мають змогу використовувати портативні блокноти для запису приміток, текстового редагування та зберігання зустрічей. Їх

клавіатури можуть складатися із стандартних машинок QWERTY або конфігурацій Брайля використовуючи шість-вісім клавіш та пробіл. Клавіші представляють крапки Брайля. Клавіатури Брайля також доступні в ергономічних конструкціях, розроблених для комфорту. Центральна клавіша на всіх клавіатурах виконує функції пробілу. Додаткові функції цих пристроїв можуть включати телефонні довідники, годинники, наукові калькулятори, будильники, нагадування голосового календаря та термометри. Вихідні режими для цих пристроїв складаються з синтезу мови та / або оновлення клітин Брайля (підняті символи Брайля, які відображають інформацію, яку вводить користувач). [31] Деякі системи також забезпечують можливості подвійної мови. Тому користувачі можуть або слухати інформацію, яку вони ввели, або читати інформацію через тактильний сенс, використовуючи оновлені клітини Брайля.

Сліпа людина може користуватися модифікованими комп'ютерами з різними системами введення та виведення. Системи введення включають стандартні клавіатури комп'ютера, клавіатури Брайля, код Морзе з синтезом мови або слухові сигнали (наприклад, звукові сигнали, тони або відлуння клавіш). Людина може передавати літери, цифри та розділові знаки на комп'ютер за кодом Морзе, для чого потрібні адаптації програмного забезпечення та / або обладнання за допомогою перемикачів. За допомогою одного перемикача комп'ютер розмежовує точки і тире за тим, як користувач натискає перемикач.[32] У коді Морзе з двома комутаторами один перемикач призначений для крапок, а один - для тире. У користувача також є можливість використовувати третій перемикач як вхідний перемикач. Сліпі люди можуть користуватися цією системою зі слуховим зворотним зв'язком, що повторюється буквою чи командою, яку вони ввели. Особи, які є сліпими та фізично важкими, можуть обрати такий підхід.

## ВИСНОВКИ

1) Встановлено, що у порівнянні з електромеханічними вольтметрами аналогові електронні вольтметри мають такі переваги: широкий частотний діапазон вимірюваної напруги від одиниць герц до сотень мегагерц; слабку залежність показань від частоти вимірюваної напруги в робочому діапазоні частот; високу чутливість, практично постійну в робочому діапазоні частот, широкий динамічний діапазон від десятих часток до сотень вольт (завдяки застосуванню підсилювачів і подільників напруги); мізерно малу потужність споживання, так як мають великий вхідний опір (10-106 МОм), малу вхідну ємність (1-4 пФ) »але в той же час розвивають потужність, достатню для приведення в дію вихідного магнітоелектричного вимірника.

2) У даному пристрої застосуємо механізм вимірювальний типу М2027-М1. Даний прилад має величину внутрішнього опору 3 кОм та величину струму максимального відхилення стрілки 100 мкА.

3) Встановлено, що для того, щоб зменшити вплив температури послідовно з вимірювальним механізмом ставиться додатковий резистор, номінальне значення якого в 5 ... 10 разів більше його внутрішнього опору. В розрахунку приймемо  $R_{доб} = 15 \text{ кОм}$ .

4) Опираючись на встановлені межі вимірювання каналового електронного вольтметра та коефіцієнт ділення вхідного дільника, напруги на ступенях загасання атенюатора  $U_i$  будуть відповідно рівні, отримаємо наступні дані:  $U_1 = 1 \text{ мВ}$ ;  $U_2 = 3.16 \text{ мВ}$ ;  $U_3 = 10 \text{ мВ}$ ;  $U_4 = 31.6 \text{ мВ}$ ;  $U_5 = 100 \text{ мВ}$ ;  $U_6 = 316 \text{ мВ}$ .

5) Застосовується для вимірювання постійного струму стаціонарних, переносних пристроїв, що експлуатуються в різних областях промисловості, науки і техніки в якості приладів, що показують.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 2004.
2. Гусев В.Г., Мулик А.В. Проектирование электронных аналоговых измерительных устройств. – Уфа, 1990 г.
3. А.И. Аксенов, А.В. Нефедов. Резисторы, конденсаторы, провода, припои, флюсы. Справочное пособие. – М.: “Солон-Р”, 2000 г.
4. The Complete RS Catalogue on CD. 2004 г.
5. Каталог фирмы “ЧИП Индустрия”. 2003 г. [www.chipindustry.ru](http://www.chipindustry.ru).
6. Шишмарев В. Ю. Электрорадиоизмерения. Практикум / В.Ю. Шишмарев. М.: Академия, 2006.
7. Метрология, стандартизация и сертификация / Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. М.: Академия, 2007.
8. Информационно-измерительная техника и электроника / Г.Г. Раннев, В.А. Сурогина, В.И. Калашников и др. М.: Академия, 2006.
9. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника / К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович и др. СПб.: Питер, 2008.
10. Метрология и радиоизмерения / В. И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков и др. М.: Высшая школа, 2006.
11. Хамадулин Э.Ф. Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах / Э.Ф. Хамадулин. М.: Высшее образование; Юрайт-Издат, 2009.
12. Комплект документации к лабораторной установке «Электрические измерения». СПб.: СПбГУТ, 2008.
13. ДСТУ 3989-2000 Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів. – К. Держстандарт України, 2000.

14. Невизначеність вимірювання : навч. посібник / С.І.Кондрашов, В.М.Чинков, О.Л.Харченко. – Харків : НТУ «ХП», 2010. – 80 с.
15. Жуйков В.Я., Бойко В.І., Зорі А.А., Співак В.М., Багрій В.В. Схемотехніка електронних систем. Т. 2. Цифрова схемотехніка. Київ. Аверс. 2002. – 405 с.
16. Епифанов С. Н., Красных А. А. Электроизмерительные приборы. Справочно-методическое пособие — Киров: Изд. ВятГТУ, 2005
17. Ветчинкин А. Высокоомный вольтметр постоянного тока // Радио.-2006.-№11.-С.8-10.
18. Долгий А. Что показывает вольтметр переменного тока? // Радио.-2006.-№6,-С.23-27.
19. Першенко П. Переделка акумуляторного вольтметра // Радіоаматор.-2007.-№2.-С.33.
20. Першин В. Автомобильный вольтметр // Радиомир.-2004,-№4.-С.25.
21. Прокопцев Ю. Урок внутри вольтметра // Юный техник.- 2004.-№10.-С.70-75.
22. Саволук А. Цифровой вольтметр с самоблокировкой // Радіоаматор.-2003.-№12.-С.34.
23. Светодиодный вольтметр с растянутой шкалой // Радиомир.-2006.-№9.-С.29-30.
24. Федоров О. Цифровой мини-вольтметр с ЖКИ // Радио. - 2002. - № 11.- С.24-26.
25. Шарапов Ф. Вол Федоров О. Цифровой мини-вольтметр с ЖКИ [Текст] / О.Федоров // Радио. - 2002. - № 11.- С.24-26.
26. Шарапов Ф. Вольтметр электромонтёра [Текст] / Ф. Шарапов // Радиомир. - 2003. - N10. - С. 36-37.
27. Сучков А.А. Аналоговые и цифровые измерительные устройства.: Семестровый курс лекций. – Ростов-на-Дону, 2008. – Электронное издание.
28. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. 2006 г.
29. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника. 2006 г.

30. Панфилов В. А. Аналоговые методы и средства электрических измерений — М.: НТФ "Энергопрогресс", 2006
31. А. А. Афонский, В. П. Дьяконов Измерительные приборы и массовые электронные измерения. (Специфика измерений / современные мультиметры / источники напряжений и токов / все виды осциллографов / лаборатории на компьютере / паяльное оборудование) — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007
32. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009